

### SUMMARY

DE 19705119 discloses a method for increasing the dynamic range in measurements through Shack-Hartmann sensors, involving subdividing a wave front coming from a laser or other collimated light sources and formed by optic elements through a beam splitter onto at least two channels. The light in each channel falls onto a micro-lens field with respectively coupled detector, such as a CCD chip.

The focus spots are detected and are evaluated in reference to their positions, and the wave front is reconstructed through calculations of the focus positions. The measuring sensitivity in each channel is preferably differed by a suitable design of the micro-lens fields, and a detection channel with a smaller sensitivity is used to eliminate appearing ambiguities in sensitive detection channels.



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 197 05 119 A 1

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
G 01 J 9/00

21 Aktenzeichen: 197 05 119.7  
22 Anmeldetag: 11. 2. 97  
43 Offenlegungstag: 13. 8. 98

DE 197 05 119 A 1

71 Anmelder:  
Schwider, Johannes, Prof. Dr., 91056 Erlangen, DE

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren zur Erhöhung der Meßdynamik des Shack-Hartmann Sensors

57 Bei der Messung von Wellenfronten mittels Shack-Hartmann-Sensor treten bei größeren Wellenfrontneigungen Eindeutigkeitsprobleme auf, da dabei leicht der Bereich einer Subapertur der dazugehörigen Linse im Linsenfeld vom Fokusspot überschritten werden kann. Dadurch entstehen Zuordnungsprobleme. Durch Verkürzung der Fokuslänge bei konstantem Linsendurchmesser läßt sich zwar der Eindeutigkeitsbereich vergrößern. Dabei geht allerdings die erwünschte Empfindlichkeit verloren. Deshalb wird in dem vorliegenden Patent durch die Kombination von zwei Sensoren stark unterschiedlicher Empfindlichkeit das Eindeutigkeitsproblem überwunden, ohne daß Genauigkeitseinbußen hingenommen werden müssen. Vielmehr werden die Mehrdeutigkeiten des empfindlicheren Sensors durch die eindeutige Zuordnung des unempfindlichen überwunden. Dazu muß das Wellenfeld gleichzeitig von beiden Sensoren detektiert und ausgewertet werden. Zur Strahlteilung lassen sich sowohl teildurchlässige Teilerspiegel als auch diffraktive optische Elemente einsetzen. Durch die Hinzunahme einer gewöhnlichen Kamera (also ohne Linsenfeld im Eingang) lassen sich zusätzlich Mehrdeutigkeiten via Software auflösen.

DE 197 05 119 A 1

Der Shack-Hartmann Sensor ist ein bekanntes Verfahren zur Vermessung von Wellenfronten, es wird in der optischen Meßtechnik in vielfältiger Variation angewandt. Die Leistungsfähigkeit des Sensors wird jedoch bei vielen Meßproblemen (z. B. Vermessung asphärischer Oberflächen) durch den notwendigen Kompromiß zwischen Meßgenauigkeit und maximaler Meßdynamik reduziert. Je größer der zu messende Bereich von Wellenfrontsteigungen ist, desto geringer ist das axiale Auflösungsvermögen des Shack-Hartmann Sensors.

Es wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem es möglich ist, den dynamischen Bereich von Wellenfrontmessungen mit dem Shack-Hartmann Sensor bei gleichzeitig hoher Meßgenauigkeit wesentlich zu erhöhen. Dazu werden Shack-Hartmann Sensoren mit unterschiedlichem Design in geeigneter Weise kombiniert, so daß das die Meßdynamik reduzierende Mehrdeutigkeitsproblem effektiv ausgeschaltet werden kann.

#### Prinzip des Shack-Hartmann Sensors

**Bild 1** zeigt das Prinzip des Shack-Hartmann Sensors. Die lateralen Spotpositionen hängen von der mittleren Steigung der Wellenfront über den einzelnen Mikrolinsen ab. Mißt man mittels einer CCD-Kamera die lateralen Abweichungen ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) der Spots von den lokalen optischen Achsen, so können sie als partielle Ableitungen interpretiert werden:

$$\{\nabla W\}_{pq} = \left\{ \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} W \right\}_{pq} = \frac{1}{f} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die einzelnen Spots dieses diskreten zweidimensionalen Gradientenfeldes seien mit den Indizes p und q versehen.

Aus diesem Stützstellenfeld kann durch ein spezielles Fit- und Integrationsverfahren ein XY-Polynom  $W_{xy}$  berechnet werden, welches die Wellenfront repräsentiert:

$$W_{xy} = \sum_{i=0}^G \sum_{j=0}^i a_{ij} x^i y^{i-j} \quad (2)$$

#### Parameter des Shack-Hartmann Sensors

Die Meßgenauigkeit und der maximale Bereich, der mit dem Shack-Hartmann Sensor meßbaren Wellenfrontsteigungen, hängen im wesentlichen vom Design der Mikrolinsen ab. Hierbei spielen die Brennweite  $f_{ML}$  und die Subaperturgröße  $D_{Sub}$  (Abstand zwischen den Mittelpunkten der Linsen) der Mikrolinsen die entscheidende Rolle.

#### Genauigkeit der Messung der Wellenfrontsteigungen

Bei gegebenem Spotbestimmungsfehler  $\Delta r_{min} = (\Delta x_{min}, \Delta y_{min})$  resultiert ein Fehler in der Messung der lokalen Wellenfrontsteigung (hier in x-Richtung) von

$$\Delta \left( \frac{\partial W_{err}}{\partial x} \right) \approx \Delta \tan \alpha_x = \frac{\Delta x_{min}}{f_{ML}} \quad (3)$$

Die Genauigkeit der Messung der Wellenfrontsteigungen hängt also reziprok mit der Brennweite der Mikrolinsen zusammen.

#### Laterale Auflösung

Die Anzahl der Meßpunkte, mit der eine gegebene Wellenfront abgetastet wird, hängt von der Subaperturgröße  $D_{Sub}$  ab. Die punktuelle Genauigkeit der Abtastung hängt hingegen vom Durchmesser der Linsen  $D_{ML}$  ab, der, wie im **Bild 1** dargestellt, auch kleiner als  $D_{Sub}$  sein kann.

#### Maximale Dynamik

Die maximal meßbare Wellenfrontsteigung wird von der Brennweite  $f_{ML}$  und der Subaperturgröße  $D_{Sub}$  der Mikrolinsen beeinflusst. Es gilt folgende Formel:

$$(\tan \alpha)_{max} = \frac{\Delta r_{max}}{f_{ML}} = \pm \frac{D_{Sub}}{2f_{ML}} \quad (4)$$

Diese Formel beruht auf der Voraussetzung, daß die einzelnen Lichtspots ihre Subapertur nicht verlassen dürfen, da

sonst algorithmisch eine eindeutige Zuordnung der Spots zu den Referenzpunkten zunächst nicht möglich ist. Dieses Mehrdeutigkeitsproblem ist bei der Vermessung stark aberranter Wellenfronten mit hoher gewünschter Präzision ein ernsthaftes Problem.

Legt man sich auf ein bestimmtes laterales Auflösungsvermögen durch Wahl einer bestimmten Subaperturgröße  $D_{\text{Sub}}$  fest, so bleibt nur noch die Brennweite  $f_{\text{ML}}$  als wesentlicher Parameter für das Linsendesign. Das bedeutet, daß man einen Kompromiß zwischen Meßgenauigkeit und Meßdynamik schließen muß.

#### Erhöhung der Meßdynamik bei vorgegebener Meßgenauigkeit

Obengenanntes Mehrdeutigkeitsproblem kann vermieden werden, wenn es möglich ist, auch außerhalb einer Subapertur liegende Spots eindeutig ihren Referenzpunkten zuzuordnen.

**Bild 2** zeigt schematisch ein Spotfeld, welches von einem mit einer stark verkrümmten Wellenfront beleuchteten Mikrolinsen-Array **1** (Brennweite  $f_{\text{ML1}}$ ) erzeugt wurde. In einigen Bereichen befinden sich die Spots zwar noch innerhalb ihrer Subaperturen, in anderen Bereichen ist dies jedoch nicht der Fall. Die Spots sind hier in die nächste Subapertur in radialer Richtung ausgewandert, was in diesem speziellen Fall zur Folge hat, daß in einigen Subaperturen keine, in anderen jedoch zwei Spots zu finden sind.

Wenn man nun die Wellenfront mit einem zweiten Shack-Hartmann Sensor abtastet (**Bild 3**), dessen Mikrolinsen eine deutlich kleinere (ca. 1 Größenordnung) Brennweite besitzen, dann erhält man ein zweites Stützstellenfeld, das jedoch im gesamten Bereich eindeutig ist (**Bild 4**). Die Spotpositionen der Messung mit den beiden Shack-Hartmann Sensoren hängen über die Gleichung

$$\Delta r_{(1)} = \frac{f_{\text{ML1}}}{f_{\text{ML2}}} \cdot \Delta r_{(2)} \quad (5)$$

zusammen, weshalb der zu der "leeren" Subapertur gehörende Spot durch folgendes Verfahren ermittelt werden kann:

1. Schritt: Bestimmung der Spotposition  $\Delta r_{(2)}$ , gemessen mit SHS2.
2. Schritt: Berechnung der ungefähren Spotposition  $\Delta r'_{(1)}$  durch Gleichung 5.
3. Schritt: Bestimmung der genauen Spotposition  $\Delta r_{(1)}$  aus dem Kamerabild des Sensors SHS1, wobei nur ein gewisser Bereich um  $\Delta r'_{(1)}$  herum berücksichtigt wird.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Vermessung von Wellenfronten **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Wellenfront herrührend von Lasern oder anderen kollimierten Lichtquellen, geformt von optischen Elementen in Durchlicht beziehungsweise in Reflexion, durch einen Strahlteiler auf mindestens zwei Kanäle aufgeteilt wird, in jedem Kanal auf ein Mikrolinsenfeld mit jeweils nachgeschaltetem Detektor wie etwa CCD-Chip fällt, die Fokusflecke detektiert und bezüglich ihrer Positionen ausgewertet werden und die Wellenfront durch weitere Verrechnung der Fokuspositionen rekonstruiert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, daß sich die Meßempfindlichkeit durch geeignete Designs der Mikrolinsenfelder in den verschiedenen Kanälen unterscheiden und ein Detektionskanal mit einer geringen Empfindlichkeit dazu herangezogen wird, auftretende Mehrdeutigkeiten in empfindlichen Detektionskanälen zu beseitigen.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2 **dadurch gekennzeichnet**, daß zusätzlich Information über die Stetigkeit der zu messenden Wellenfronten dazu ausgenutzt wird, bei Positionen von Fokusflecken außerhalb einer Subapertur einer Mikrolinse eindeutige Zuordnungen der Fokusflecke zur zugehörigen Subapertur zu treffen.
4. Verfahren nach Anspruch 1-3 **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei oder mehrere Kanäle versehen mit unterschiedlichen oder identischen Mikrolinsenfeldern (z. B. in unterschiedlicher Orientierung) dazu benutzt werden eine höhere Auflösung oder eine Verminderung des Rauschens bei der Messung von Wellenfronten zu erzielen.
5. Verfahren nach Anspruch 1-4 **dadurch gekennzeichnet**, daß zusätzlich über einen oder mehrere parallelgeschaltete Detektionskanäle ohne vorgeschaltete Mikrolinsenfelder in geeigneter Weise, gegebenenfalls unter Verwendung von Hilfsoptik, Lage und Position eines Prüflings zwecks Zuordnung der gemessenen Wellenaberrationen zum Prüfling gemessen werden.
6. Verfahren nach Anspruch 1-5 **dadurch gekennzeichnet**, daß bei Verwendung von Licht mit verschiedenen Wellenlängen die Aufteilung der Wellenfront in die verschiedenen Kanäle mit einer Prismenanordnung ähnlich einem Dreifach-Farbteiler in Fernsehsystemen durchgeführt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1-5 **dadurch gekennzeichnet**, daß zur optimalen Intensitätsaufteilung zwischen den verschiedenen Kanälen Halbwellenplatten und Polarisationsstrahlteiler verwendet werden.
8. Verfahren nach Anspruch 1-5 **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Strahlteilung eine Prismenanordnung ähnlich der für Dreifach-Farbteiler in Fernsehsystemen verwendet wird, allerdings mit der Maßgabe, daß die Aufteilung nicht bezüglich unterschiedlicher Farben sondern so erfolgt, daß jeder Detektionskanal eine angemessene Intensität erhält.
9. Verfahren nach Anspruch 1-5 **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Strahlteilung diffraktive optische Elemente eingesetzt werden und die Intensitätsbalance über die Beugungseffizienz für die einzelnen durch Beugung erzeugten Teilwellen eingestellt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 1-9 **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Querschnittstransformation der Wellenfront in einem oder mehreren Kanälen ein Keplerteleskop eingesetzt wird und der Shack-Hartmann Sensor am Ort des reellen und verkleinerten Bildes positioniert wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1-9 dadurch gekennzeichnet, daß zur Querschnittsanpassung der zu messenden Wellenfront an den Detektor (z. B. CCD-Chip) in einem oder mehreren Kanälen zwischen der Brennebene des Mikrolinsenfeldes und dem Detektor ein Querschnittstransformator (z. B. ein Glasfasertaper) eingesetzt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 1-11 dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser der Mikrolinsen kleiner als der Abstand ihrer Mittelpunkte (Subaperturgröße) sein kann.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

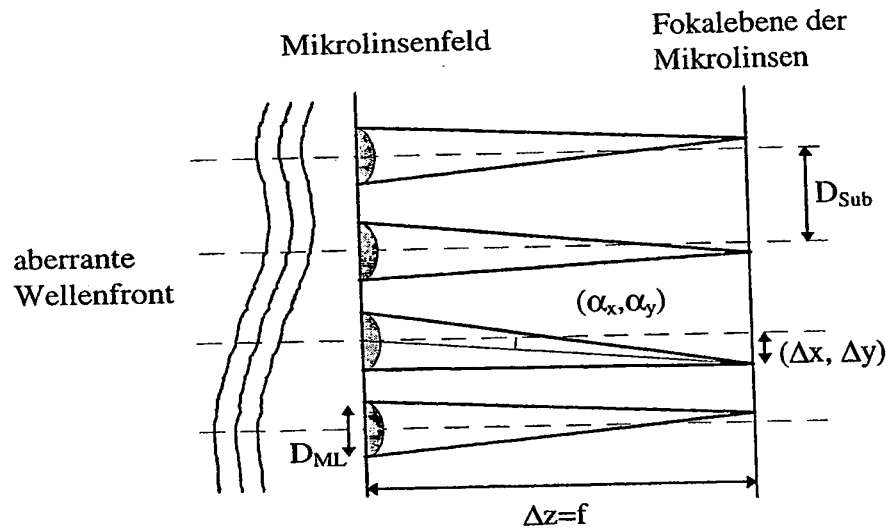


Bild 1: Prinzip des Shack-Hartmann Sensors

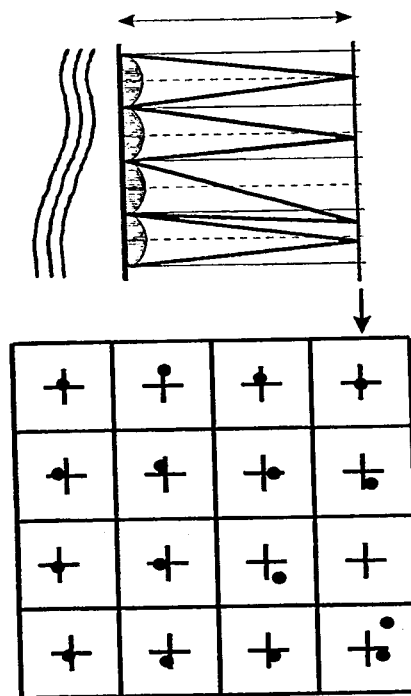


Bild 2: Spotfeld mit Mehrdeutigkeiten, gemessen mit SHS1

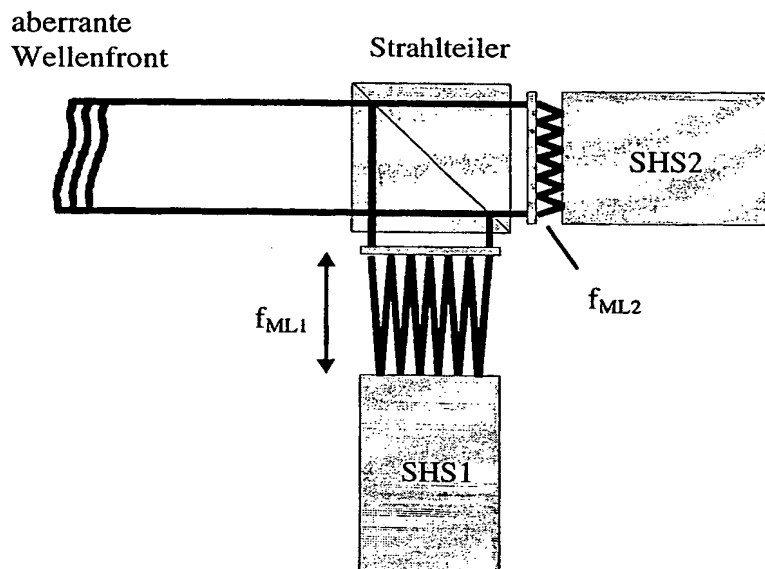


Bild 3: Wellenfrontmessung mit zwei Shack-Hartmann Sensoren

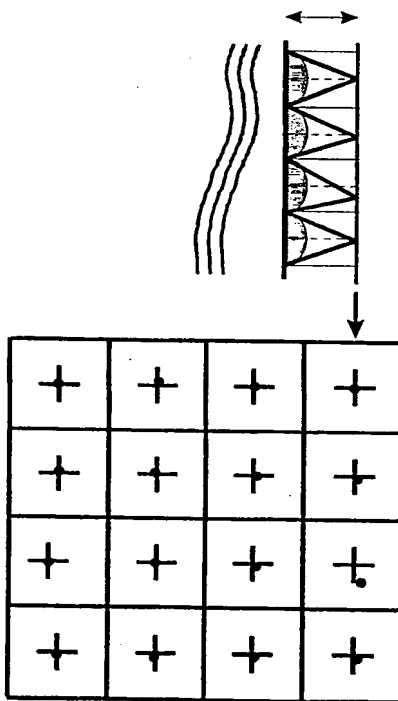


Bild 4: Spotfeld ohne Mehrdeutigkeiten, gemessen mit SHS2